

固有振動数の異なる建造物の振動－滑動挙動の振動台実験による観察

豊橋技術科学大学大学院工学研究科・機械 構造システム工学専攻 学生会員 渡邊潤平

豊橋技術科学大学・工学部・建設工学系 正会員 三浦均也

東北学院大学・工学部・環境建設工学科 正会員 吉田望

港湾空港技術研究所・構造振動研究室 正会員 小濱英司

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・建設工学専攻 学生会員 西川洋人

1. はじめに

一般に建造物はそれぞれに固有の振動特性を有しており、地震時における地盤振動の特性との相対関係により、建造物の地震時における振動挙動は異なったものとなる。このことは、建造物の地震時振動応答で研究されており、耐震設計等で広く用いられている地震応答スペクトルの概念ともなっている。したがって、地震時における建造物の振動応答のみならず滑動応答も同様に建造物の振動特性と地盤振動の相対関係に強く依存すると考えられる。これまで、建造物や盛土の地震時滑動量を推定するためには、Newmarkが提案している剛体－滑動モデル¹⁾²⁾が解析的な研究手法として用いられてきた。しかし、建造物の振動特性を考慮せずに建造物を剛体と仮定するこのモデルでは、建造物の振動特性を適切に考慮して滑動応答を精度良く計算することは困難である。この問題を解決するために、著者らは振動－滑動モデルの適応性を検討してきた³⁾。

本研究では、固有振動数の異なる建造物の振動－滑動挙動を詳細に検討することを目的として、振動－滑動モデルの模型（物理モデル）について一連の振動台実験を実施した。本論文では、まず、振動－滑動モデル（数理モデル）による数式解の概要および計算結果を示して、建造物の滑動挙動における振動特性の重要性を示す。次に、振動台実験での観察結果を整理して物理モデルの滑動－振動挙動を詳細に検討する。最後に、物理モデルでの観察結果と数理モデルによる計算結果を対照して、モデルの妥当性を検討する。

Vibration-Sliding Mathematical Model

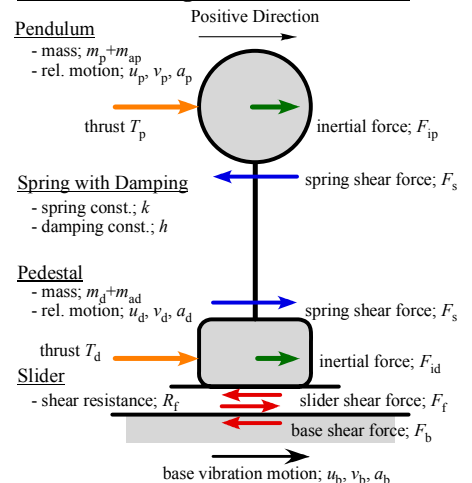


図 - 1 振動 - 滑動数理モデル

2. 振動－滑動数理モデル

2.1 振動－滑動数理モデルの概要

図 - 1 に示す振動－滑動数理モデルは2質点とそれらを連結するバネ k (ダッシュポット c を含む) およびスライダで構成される。倒立振子と台座、スライダからなるモデルでは、振子 (Pendulum) と台座 (Pedestal) の部分にそれぞれ質点 m_p と m_d を有している。この2質点のバランスは解析対象とする建造物に合わせて質点パラメータ $\gamma (0 \leq \gamma \leq 1)$ によって規定し、図 - 2 に示すように $\gamma=1$ では振子に質量が集中した倒立振子型に、 $\gamma=0$

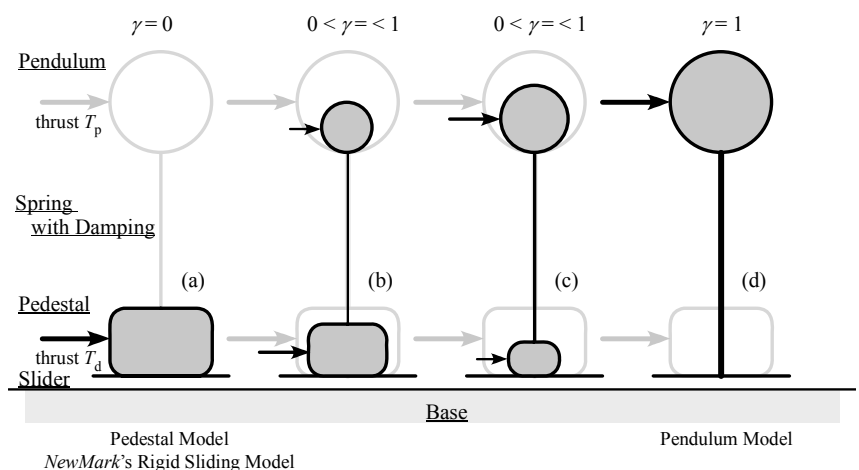


図 - 2 質点パラメータ γ による影響

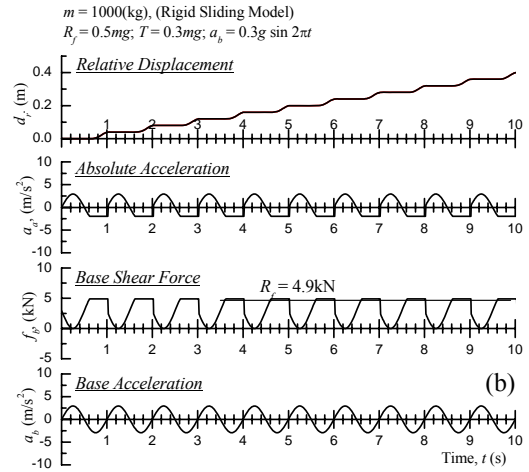
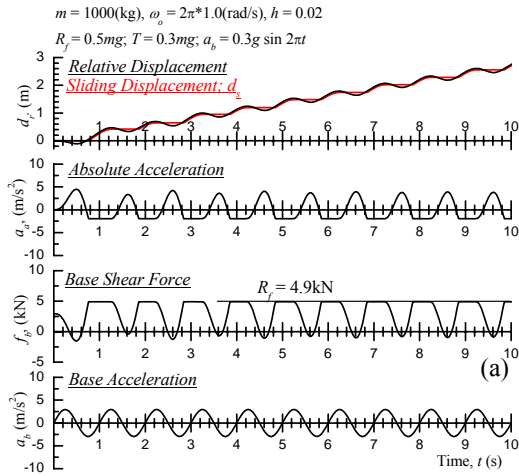


図-3 サイン波による振動-滑動応答時刻歴 (a) 倒立振子モデル($\gamma=1$), (b) 剛体モデル($\gamma=0$)

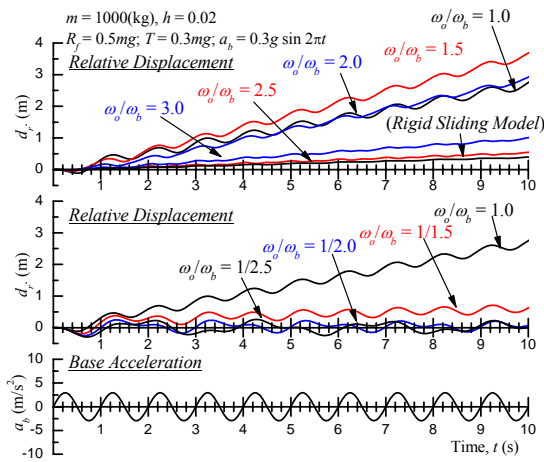


図-4 サイン波基盤振動に対する振動-滑動応答
に及ぼす固有振動数の影響

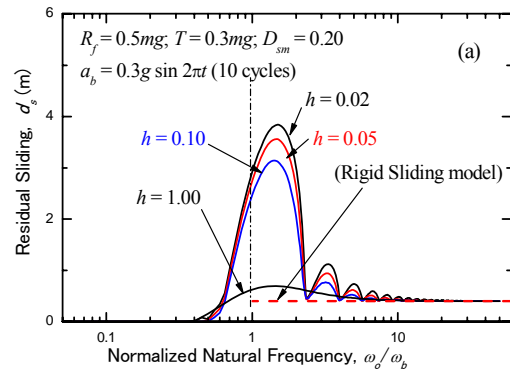


図-5 サイン波基盤振動に対する応答滑動スペクトル
(減衰率 h をパラメータとして)

では台座部に全質量が集中して倒立振子が消滅した剛体-滑動モデルとなる。モデルにはすべり面の傾斜による自重の分力あるいは常時の土圧に相当する水平力 T が作用している。この状態で基盤の振動(変位 u_b)を受けると、スライダに発生する底面せん断力 F_b がせん断抵抗力 R_f を超えるときにすべりが発生し、水平力 T の方向にすべり量が蓄積されることになる。 $\gamma=0$ の時の剛体-滑動モデルは、Newmark¹²⁾が地震時における盛土などの滑動を計算するために提案したモデルに等価である。一方、澤田ら⁴⁾は盛土の降伏変形を求めるために地盤材料の連続体としての変形を弾完全塑性モデルで解析して耐震設計の道筋を示すなかで、倒立振子型モデルの有用性を検討している。

以下の枠内に、振動-滑動数理モデルにおける運動方程式ならびに滑動時および非滑動時の条件式を示す。ここで添え字 p は振子(Pendulum)に、添え字 d は台座(Pedestal)に、s はバネ(Spring)に対応するパラメータであ

振動 - 滑動数理モデル	$m_p = \gamma m, m_d = (1 - \gamma)m$ $T_p = \gamma T, T_d = (1 - \gamma)T$ $F_{ip} = -m_p a_b, F_{id} = -m_d a_b$ $F_s = c v_s + k u_s$ $R_f = \mu mg$	非滑動時 [$v_d = 0$, and $F_f \leq R_f$] $v_d = 0$
$\begin{cases} m_p a_p = T_p + F_{ip} - F_s \\ m_d a_d = T_d + F_{id} + F_s - F_f \end{cases}$		滑動時 [$v_d > 0$, or $F_f = R_f$] $F_f = R_f$

ることを示している。これらは時間領域における非線形な連立方程式になるため、離散化して直接積分法によってモデルの振動-滑動挙動を計算した。

2.2 振動-滑動数理モデルによる解析結果

基盤振動にはサイン波を用い、モデルの基本的なパラメータは表-1に示した。

図-3には基本条件における倒立振子モデル ($\gamma=1$) と剛体モデル ($\gamma=0$) の応答を時刻歴で対比して示している。下段より、基盤振動加速度、底面せん断力、質点の絶対加速度、質点の相対変位の順である。図-3(a)の最上段にはスライダーにおける滑動変位を赤線で書き込んでいる。図示のように、両者とも基盤振動への応答により底面せん断力がせん断抵抗力に達すると同時にすべりが発生している様子が分かる。このとき、剛体モデル(図-3(b))では、質点は振動せずに単に滑動量が蓄積される一方であるが、倒立振子モデル(図-3(a))では質点の応答振動を伴いながら滑動による変位が蓄積されていることが分かる。また、蓄積された滑動量も倒立振子モデルと剛体モデルでは5倍程度の違いがあることがわかる。

図-4は振動-滑動応答に及ぼす固有振動数の影響を明らかにするために固有振動数の基盤振動角振動数に対する比 ω_0/ω_b を広範囲に変化させて質点の変位を比較して示している。図には $\gamma=0$ の場合も同時に示している。図から明らかのように、滑動応答は固有振動数の影響を大きく受けて変化することがわかる。共振現象に相当する $\omega_0/\omega_b=1$ の条件よりも系が少し硬くなり、大きな固有振動数を有する場合に滑動量は極大となることが分かる。また、系が軟らかくなり、固有振動が基盤振動数の半分 $\omega_0/\omega_b=1/2$ 程度になれば発生するすべり量は無視できるほど小さくなることも分かる。一般に、モデルの振動特性を無視して剛体-滑動モデルを用いる場合には、滑動量を過小に評価する危険性があるといえる。

図-5は減衰率 h をパラメータとして計算した残留滑動量 d_s を固有振動数の基盤振動角振動数に対する比 ω_0/ω_b に対してプロットしたものである。応答滑動量は固有振動数が基盤振動数の1.5倍から2.0倍の範囲 ($1.5 < \omega_0/\omega_b < 2.0$) で極大(最大)値を取ることがわかる。図には破線で $\gamma=0$ の場合の計算結果も示しているが、倒立振子モデルとは異なり、振動特性を考慮できないため滑動応答は一定の値を示している。倒立振子モデルによる滑動応答は、図の右側、すなわちモデルのバネの剛性が高くなるにつれて $\gamma=0$ の滑動応答に漸近する傾向を示している。

表-1 サイン波を用いた解析の基本的な条件

質量	$m=1000 \text{ kg}$
固有角振動数	$\omega_0=2\pi \text{ (rad/s)}; f_0=1.0\text{Hz}$
減衰比	$h=0.2$
水平力	$T=0.3\text{mg}$
せん断抵抗力	$R_f=0.5\text{mg}$
(滑動余裕度)	$D_{sm}=(R_f-T)/\text{mg} = 0.2$
基盤振動	$a_b=0.3g \sin \omega_b t = 0.3g \sin 2\pi t \text{ (10 cycles)}$

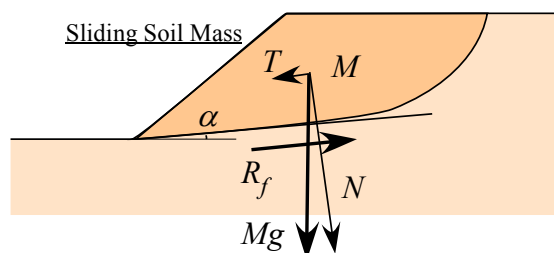


図-5 堤体の地震時におけるすべりを伴う変形のモデル化

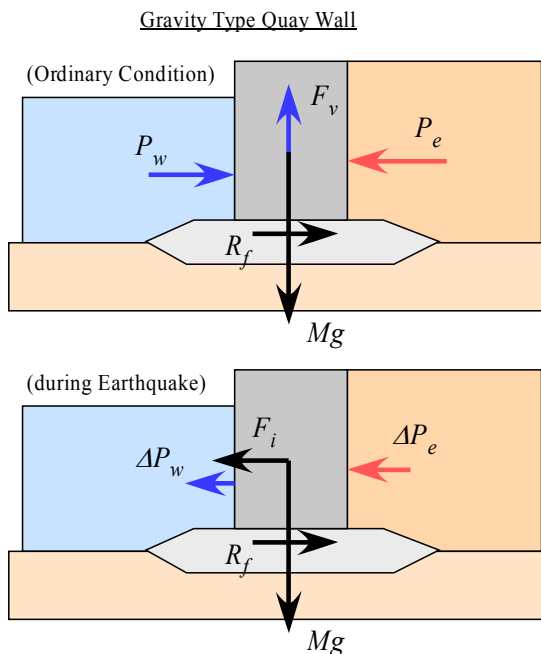
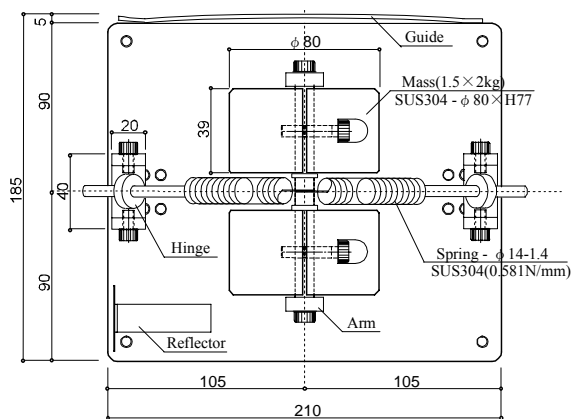


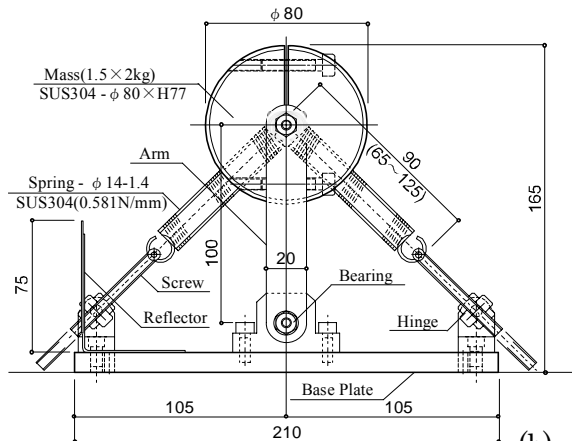
図-6 重力式岸壁の地震時におけるケーソンのすべりを伴う変形のモデル化

図-6重力式岸壁の地震時におけるケーソンのすべりを伴う変形のモデル化



(a)

Plane View

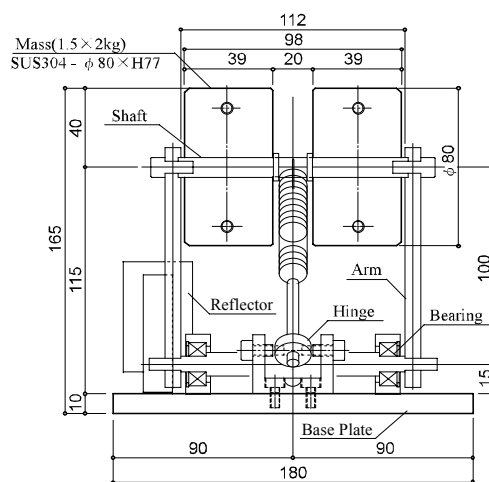


(b)

Front View



写真 - 1 振動 - 滑動物理モデルの外観



(c)

Side View

図 - 7 振動 - 滑動物理モデル : (a) 平面図, (b) 正面図, (c) 側面図

2.3 実際問題への適用

図-5は堤体の肩部分に生じるすべりの様子を模式的に示している。すべり土塊底部のすべりを代表する傾斜角を α とし、土塊の質量を M としている。この場合、図-1に示した振動-滑動モデルに作用している水平力 T はすべり土塊の背後に堤体から作用する力ではなく、重力 W のすべり面に平行な成分となる。これは以下で述べる一連の振動台実験からもその適用がイメージできる。

図-6はマウンド上にケーソンを設置するタイプの重力式岸壁の常時と地震時において慣性力や外力が作用する様子を模式的に示している。ケーソンの質量を M 、底面摩擦抵抗角を ϕ_μ 、浮力を F_v とすると常時であれば、摩擦抵抗力は $R_f=(Mg-F_v)\tan\phi_\mu$ として、水平力は $T=(P_e-P_w)$ として算出でき、振動-滑動モデルへの適用が可能となる。また地震時では動水圧および動土圧を慣性力に対応させた付加質量として計算することも可能である。解析に必要なすべり土塊や構造物の固有振動数は、常時微動観測または弾性波探査などが有効となるかもしれない。振動-滑動モデルの適用については今後もさらに検討を重ねていく予定である。

3. 振動-滑動物理モデル (振動台模型)

この節では、固有振動数の異なる構造物の振動-滑動挙動を振動台実験で観察するために作製した振動-滑動物理モデルの詳細を、振動-滑動数理モデルとの対応を示しながら説明する。

3.1 振動-滑動物理モデルの構成

図-7(a), (b), (c)はそれぞれ振動-滑動物理モデルの平面図, 正面図, 側面図を示している。また写真-1はモデルの外観を示している。この物理モデルは外形で長さ 210mm, 高さ 165mm, 奥行き 180mm で、ス

ステンレスとアルミ合金を主な材料として作製した。図-7(b)から分かるように、モデルは基本的に倒立振子の構造となっている。図や写真では、倒立振子の質点に対応するモデルの上部に重さ約 1.5kg のステンレス製の円筒形錘を 2 個取り付けられているが、これらは実験条件に応じて脱着が可能である。この錘を水平に貫通する上部水平ロッドの両側は 2 本のアームを介してアルミ合金製の底板に支持されている。これらアームは上部水平ロッドと底板に固定するための下部水平ロッドに剛結している。ただし、底板の下部水平ロッドへの軸受け部にはベアリングを配して摩擦を極力低減した。底板の両脇から斜めに伸びているバネと上部水平ロッドを連結し、これにより錘が振動するときの復元力を得ている。バネ定数が異なる鋼製のバネを数種類用意した。錘の質量に加えて、バネの強度、角度を調整することで、物理モデルの質量と固有振動数を所定の範囲で変化させることができる。底板の質量は 1.52kg で、底板の裏面は平らに仕上げ。特別な加工を施さなかった。物理モデルの滑動方向は図-7(a), (b)の右側で、滑動方向に平行する底板側面の片方には模型の回転を抑止する目的で針金を加工した弱いバネを取り付けた。また底板の左端部には、レーザー変位計による滑動量測定のためにレーザー光反射板を取り付けた。

錘と上部水平ロッドは数理モデルにおける振子の錘 (Pendulum) に、アームとバネの構成は数理モデルの水平力に抵抗するバネ (Spring) に対応している。下部水平ロッドと底板は数理モデルにおける台座 (Pedestal) に対応し、底板と傾斜台との接合面は数理モデルのライダー (Slider) に対応している。底板を含めた物理モデルのすべての部材を分解した状態で重量質量を精密に測定した。アームとバネの質量は二分して錘と台座の質量に加算した。組み立てた状態における物理モデルの振動特性を把握するために、物理モデルを水平な床に置いて自由振動させることによって得られる錘の加速度履歴から固有角振動数 ω_0 と減衰定数 h を算定した。

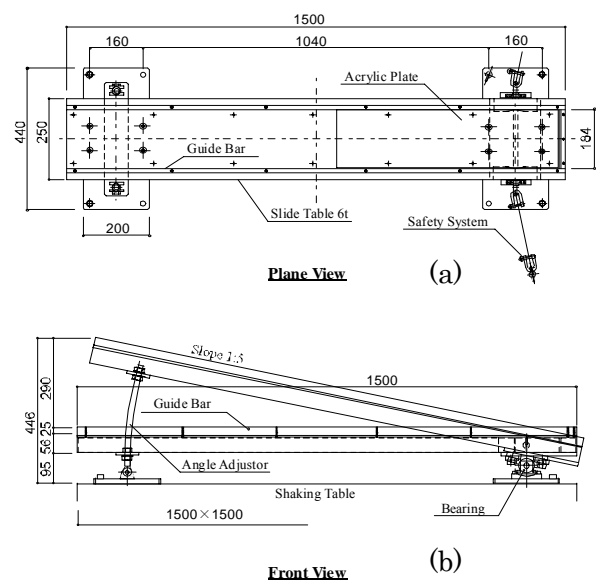


図 - 8 傾斜台設計図 : (a) 平面図, (b) 正面図

3.2 傾斜台

図-8(a), (b)はそれぞれ実験で使用した傾斜台の平面図と正面図を示している。傾斜台は全長 1500mm、幅 250mm のスチール製で、表面はラッカーによる塗装が施されている。傾斜台は振動台上にボルトで剛に固定した。傾斜台の角度は、調節ネジにより傾斜角 35°までの範囲で調整できる。これにより物理モデルに滑動を促す一定の力（すなわち、物理モデルに作用する重力の傾斜台の面に平行な成分）を作用させた状態で、加振することが可能となる。傾斜台の両側面には物理モデルの落下防止のため、高さ 25mm の防護板を取り付けた。物理モデル底面における一定の摩擦係数を確保するために、傾斜台表面にはアクリル製の薄い板を敷き、その上に物理モデルを置いた。摩擦特性は傾斜台表面の埃の状態や湿度にも依存するため、実験開始前には柔らかい乾いた布で軽く表面を拭いた。

摩擦係数は物理モデルの振動特性を調整するたびに（バネや錘の変更）、また、一連の実験の開始前に予備実験で測定した。予備実験では、傾斜台の傾斜を静的にゆっくりと上げていき、滑動開始時における傾斜台の

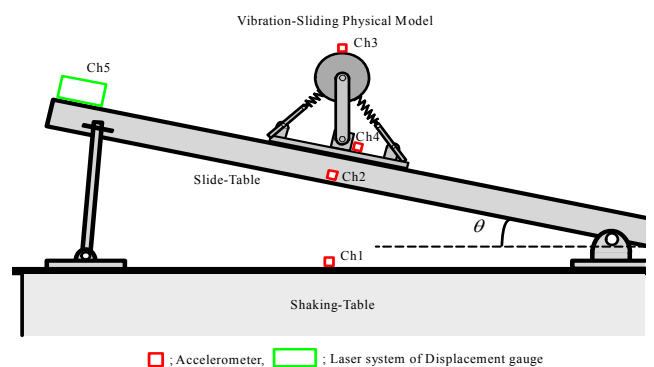


図 - 9 物理モデルと傾斜台における計測器の配置

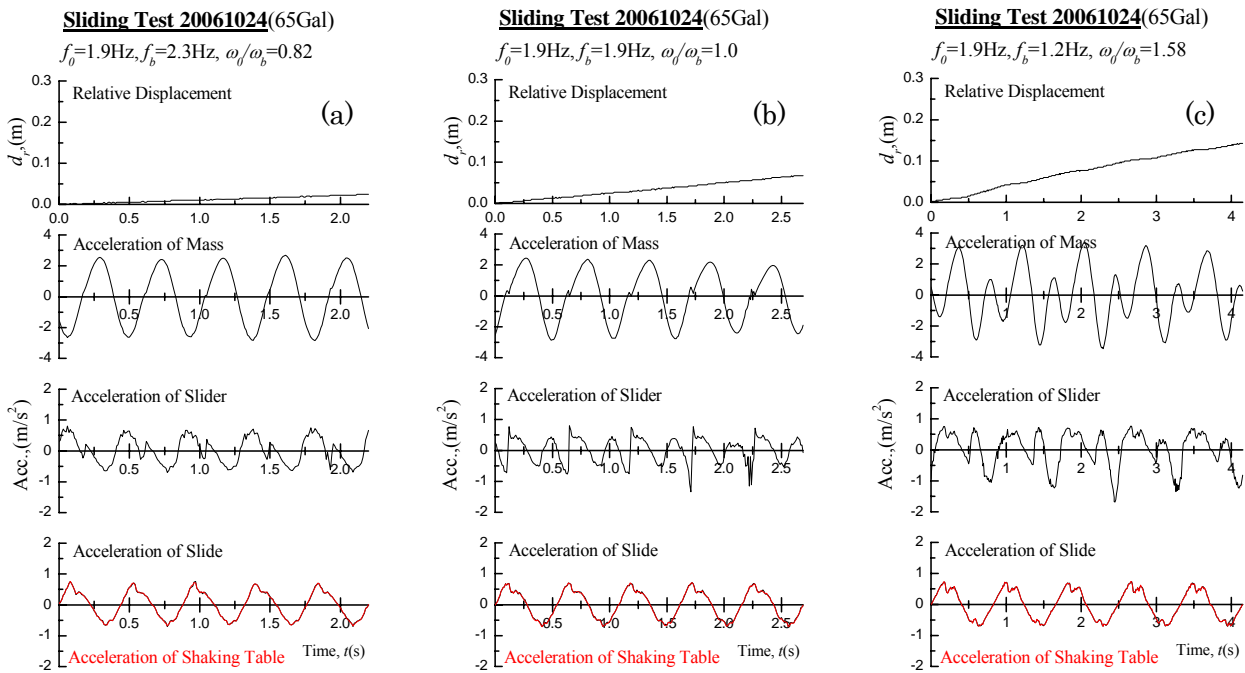


図-10 実験結果の時刻歴 : (a) $f_0/f_b=0.82$, (b) $f_0/f_b=1.0$, (c) $f_0/f_b=1.58$

傾斜角 θ を分度器で読み取ることを5回以上繰返し、その平均値の正接を静止摩擦係数 μ_s とした。

4. 振動台実験の方法

4.1 物理モデルの設置および計測器の配置と測定方法

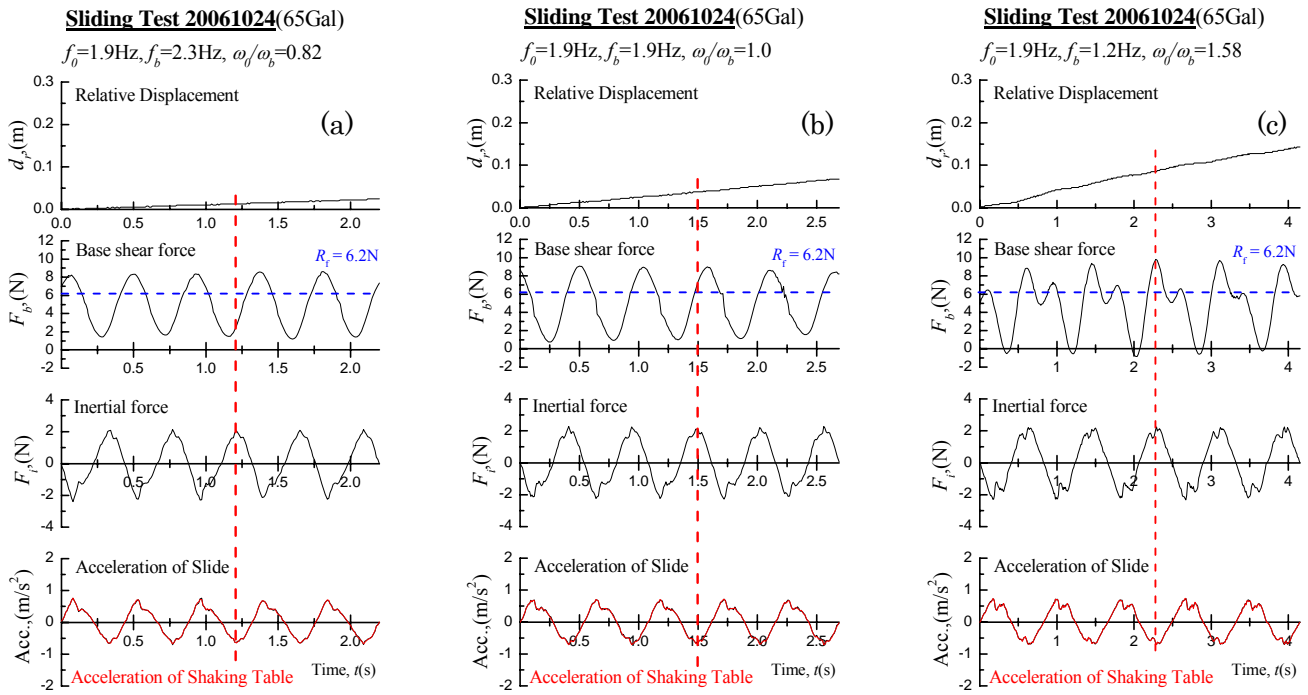
図-9に物理モデルと傾斜台における計測器の設置を示す。物理モデルは図に示すように傾斜台の上方に設置する。このとき物理モデルにおいて、錘を貫通する上部水平ロッドを支持するアームが鉛直となるようにバネの長さを調節ねじで微調整した。振動台による加振により、物理モデルは図-9の右方向へ滑動する。

物理モデルの振動-滑動挙動の計測には、加速度計(応答周波数範囲:0~46Hz)を4個、レーザー変位計(分解能: $\pm 0.5\text{mm}$)を1個用いた。設置位置は図9に示す通りで、加速度計は振動台中央、傾斜台中央、物理モデルの底板面上および錘上部の4箇所に接着剤で固定した。加速度計の極性は、図-9右向きが正方向を示している。レーザー変位計は傾斜台上側端部にボルトで固定した。したがって、レーザー変位計による測定記録は物理モデルの振動台(傾斜台)に対する相対変位である。レーザー変位計の極性は、物理モデルが図9右側へ滑動する方向が正である。これら合計5個の計測器の出力は、サンプリング周波数100Hzでパソコンに収録した。

実験で使用した既存の振動台は、縦1.5m×横1.5mの水平一方向加振のもので、最大加振力は30kN、最大振幅は $\pm 100\text{mm}$ 、周波数範囲0.5~30Hzの駆動力は電気油圧サーボ式である。本研究では、入力波形はサイン波とした。また、加振中の物理モデルの挙動をより詳細に検討する目的で、ビデオカメラによる撮影も実施した。

4.2 実験条件(物理モデルおよび傾斜台)

物理モデルの上側の質点部には重さは1.48kgの円筒形の錘を一個取り付けた。モデルの前後2本のバネは等しく、自由長65mm、最大伸び61.3mm、バネ定数0.581N/mmとした。この状態で物理モデルの自由振動を測定した結果、フーリエ解析により物理モデルの固有振動数は $f_0=1.9\text{Hz}$ 、また、自由振動の対数減衰率法により $h=0.03$ であることが分かった。物理モデルの質量は合計で $m=3.16\text{kg}$ 、この時の質量パラメータは $\gamma=0.52$ であった。



図一 1 1 実験結果の時刻歴(底面せん断力と慣性力) : (a) $f_0/f_b=0.82$, (b) $f_0/f_b=1.0$, (c) $f_0/f_b=1.58$

傾斜台表面と物理モデルとの摩擦係数は予備実験により測定したが、実施状態により幅があり、静止摩擦係数にして $\mu_s=0.18\sim 0.25$ 程度であった。すべり台傾斜角度は約 $\theta=9^\circ$ とし、数理モデルにおける水平力は $T=0.16mg$ である。

サイン波形の基盤振動は加速度振幅を 50Gal, 65Gal, 80Galの 3 ケースを行い、その中で振動数 f_b をおよそ 0.6~2.5Hzまでの範囲でパラメトリックに変化させた。

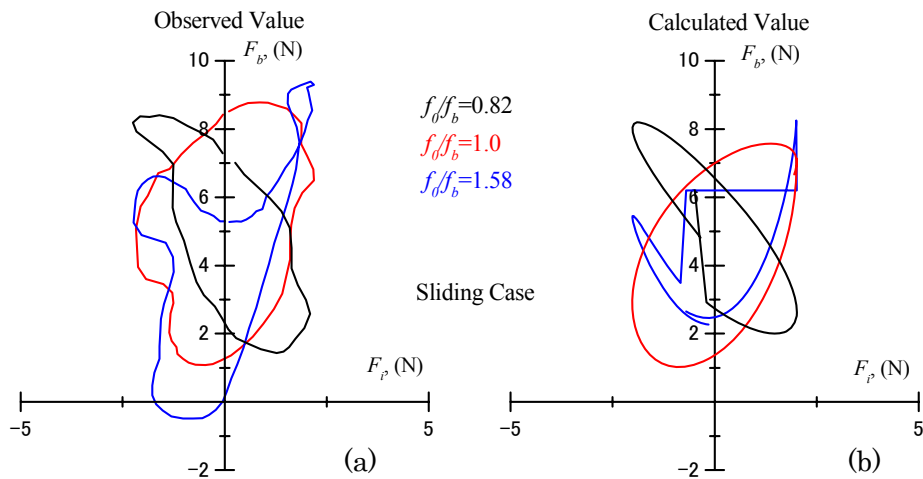
5. 実験結果および考察

図一 1 0は典型的な時刻歴(およそ 5 波分)を示している。図一 1 0(a), (b), (c)はそれぞれ加速度振幅が 65Galで等しいが、基盤の振動数が異なっている。さらに図一 1 0(a)は固有周波数 f_0 よりも振動台加速度周波数 f_b の方が大きい比較的柔な構造物に、図一 1 0(b)は共振する構造物に、図一 1 0(c)は固有周波数 f_0 よりも振動台加速度周波数 f_b の方が小さい比較的剛な構造物に対応している。上から、モデルの相対変位(滑動量)、質点の加速度、底板の加速度、最下段がすべり台と振動台の加速度を表わしている。実験装置の製作に当たってはすべり台の剛性と固定方法に配慮した結果、傾斜台と振動台の加速度に有意な差は見られなかった。

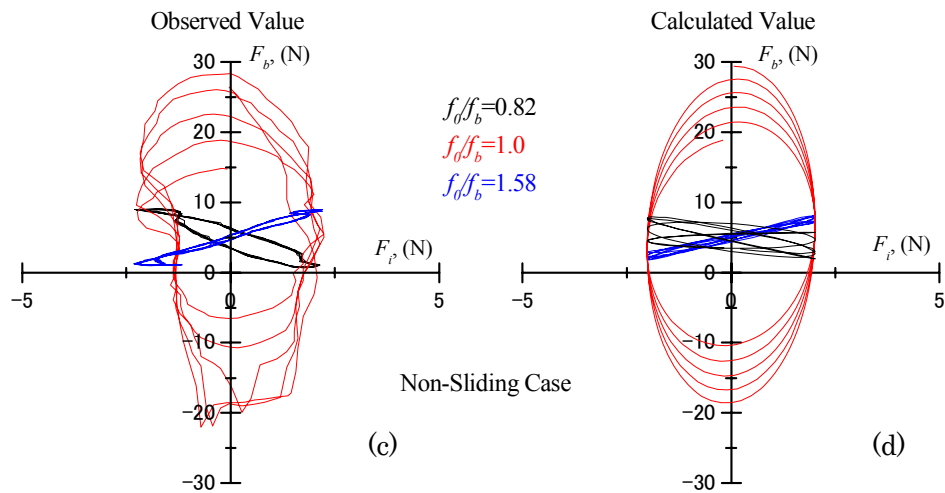
滑動量の蓄積挙動を見ると、比較的剛な構造物すなわち固有振動数よりも低い振動数で加速度を受けた場合の方が滑動量は大きく、この例では 8 倍程度の差が認められた。この傾向は振動-滑動数理モデルによる計算で明らかになっている傾向と合致している。錘の加速度には図一 1 0に示した 3つのケースで振動台加速度との間に位相の違いが読み取れ、このことが滑動量に大きく影響していると考えられる。錘の加速度振幅は共振構造物よりも比較的剛な構造物のケース(図一 1 0(c))で若干大きく、これはモデル滑動時における底面での摩擦エネルギーとしての消失による影響と考えられる。

図一 1 1は実験結果の時刻歴加速度から計算した底面せん断力と慣性力を、図一 1 0と同様の形式で示したものである。慣性力は振動台による基盤加速度にモデルの質量 m を乗じて逆向きとした値である。ニュートンの第二法則に基づいて、底面せん断力はこの慣性力と、錘と台座の加速度、および傾斜台の傾斜角から計算できる滑動力から計算した。図において底面せん断力および慣性力が正の値を示すとき、これらの力は物理モ

Relationship between Base shear Force and Inertial Force
 $m=3.1605\text{kg}$, $\gamma=0.52$, $T=0.16\text{mg}$, $h=0.01$, $\mu_s=0.27$, $\mu_d=0.20$



Relationship between Base shear Force and Inertial Force
 $m=3.1605\text{kg}$, $\gamma=0.52$, $T=0.16\text{mg}$, $h=0.01$



図一 1 2 底面せん断力と慣性力の関係

(上段：滑動時，下段：非滑動時 (a),(c)観測結果, (b),(d)解析結果)

デルを図一 9 の右方向に滑動させようとする方向に力が作用していることを示している。

図一 1 1 には慣性力のピークに合わせて，赤い破線を書き入れてある。図から明らかなように，滑動量の蓄積が最も大きかった比較的剛な構造物（図一 1 1 (c)）で，慣性力がピークを示したとき底面せん断力もピークを示し，位相の一致が確認できる。他の 2 つの条件では，慣性力がピーク時で，底面せん断力のピークは，共振する構造物（図一 1 1 (b)）では若干の位相の遅れが見られ，比較的柔な構造物（図一 1 1 (a)）に至っては 180° 程度の位相差が認められた。

また，比較的剛な構造物の場合では，慣性力が正の値のピークを含む 1 周期の間に大小 2 度のピークが発生していることがわかる。この現象は，基盤の周波数 $f_b=1.4\text{Hz}$ ，すなわち $f_0/f_b=1.35$ 程度から徐々に現れはじめ，実験で滑動変位が生じた最も基盤加速度周波数の低い条件である $f_0/f_b=1.72$ ($f_b=1.1\text{Hz}$) までで確認された。興味深いことに，大小 2 度のピークが生じたケースでは，底面せん断力における大きい側のピークと慣性力のピークの位相はいずれの場合においても合致していた。

図一 1 1 には，静止摩擦係数 $\mu_s=0.20$ として計算した摩擦抵抗力 $R_f=6.2\text{N}$ が青い破線で示してある。滑動量は

底面せん断力 F_b が摩擦抵抗力 R_f を超えたときに蓄積される。その場合、底面せん断力が摩擦抵抗力を超えている時間が長いほど滑動量は多く発生するはずであるが、図-11(c)では、摩擦抵抗力を超えている時間が短いにも関わらず、3つの中で最も大きな滑動量を示している。一方、図-11(a), (b)では、その時間が図-11(c)よりも長いにも関わらず、滑動量には反映されていないことがわかる。このことは、構造物の滑動現象における底面せん断力と慣性力との位相差が重要であることを示唆し、さらにはその位相差に影響を与える構造物の振動特性の重要性を示している。慣性力と底面せん断力の位相が合致することで、構造物には瞬間的に大きな滑動力が生じるのである。

図-12は振動-滑動物理モデルおよび数理モデルによる底面せん断力と慣性力との関係を示している。図-12(a), (b)はモデルの滑動を伴う場合を、図-12(c), (d)は比較のためモデルが滑動を伴わない場合をそれぞれ表している。図では黒線が比較的柔な構造物を、赤線が共振する構造物を、青線が比較的剛な構造物を表しており、縦軸は底面せん断力 F_b を、横軸が慣性力 F_i をそれぞれ表している。

底面せん断力と慣性力はモデル内の摩擦および滑動によるエネルギー損失により時計回りのループを描いている。実験条件では静止状態で底面せん断力は約5Nであり、モデルが剛体であれば右上がりの45度線上を振動するはずである。また滑動量は、底面せん断力が約6.2Nになったときに発生するはずである。

先に示した図-11の比較的剛な構造物の場合では、底面せん断力と慣性力の位相は合致していた。図-12(a)においても、比較的剛な構造物(青線)のループは、正の傾きを示し、底面せん断力、慣性力ともに物理モデルを滑動させようとする方向へ作用していることがこの図からも明らかであり、そのループは右上に向い細くなるといった特徴的な形状を示した。共振条件にある構造物(赤線)のループでは、正の傾きを示したが、非常に大きなループを描いており、エネルギー損失が大きいこと、また図-11で示したような位相の遅れがこのようなループを描く要因になったと考えることができる。共振条件の場合には、基盤からの振動エネルギーが効率よく伝達されるはずであるが、滑動によるエネルギー損失も大きいことが分かる。比較的柔な構造物(黒線)のループは、他の2つに比べ、明らかに負の傾きを示している。図-11(a)でも見られたように、位相には180°程度の遅れがあり、慣性力または底面せん断力のどちらかが物理モデルを滑動させようとして作用するときに、そのどちらか一方は滑動させる方向とは逆方向に作用しているということが明確であり、滑動量があまり生じなかった要因のひとつであるといえる。

図-12(b)には解析結果におけるループを示している。ループは解析結果のうち安定した1サイクル分を取り出した。解析では観測結果に影響を及ぼしていると考えられる動的な摩擦の影響を考慮して、静止摩擦係数 $\mu_s=0.27$ 、動摩擦係数 $\mu_d=0.20$ として計算を行った。図から観測結果と解析結果のループの対応は良好であることがわかる。黒線で示した比較的柔な構造物の場合、および赤線で示した共振する構造物の場合においては、ループの傾きや形状が良く対応しているといえる。比較的剛な構造物の場合においても、ループ形状は観測結果と類似しているといえる。しかし、ループの大きさに関しては観測結果よりも小さいことがわかる。

図-12(c), (d)は、滑動を伴わない場合の観測結果と解析結果を示している。観測結果では、物理モデルを傾斜台に固定して加振を行い、数理モデルにおいては、静止摩擦係数に非常に大きな値を入力することにより得られた結果である。図から観測結果と解析結果は非常に良い対応を示していることがわかる。また、比較的剛な構造物を示す青線は正の傾きを持ち、比較的柔な構造物を表す黒線は負の傾きを持つことがより明確に現れている。このことから比較的剛な構造物では大きな滑動量が生じ、比較的柔な構造物ではほとんど滑動量が生じないということがわかる。図-12において底面せん断力のみ注目すると、他の2つの場合とは異なり共振する構造物で、最も大きな底面せん断力が発生しているが、滑動量にはそのまま反映されていない。非滑動時における摩擦抵抗力は、理論的には無限大であるので、質点の応答は発散していくはずであり、図-12(c), (d)の赤線で示した底面せん断力の発生につながったと考えられる。一方で、物理モデルが滑動する場合にはモデルと傾斜台の間に、ある摩擦抵抗力が存在し、この値以上の力の伝達はできないため、質点の応答

は増大されずに図-12(a)に示した赤線のループを描き、滑動量には直接反映されないのではないかと考えられる。

また図-12は全体的に見て観測結果の底面せん断力が若干大きい。これは物理モデルの構造が影響している可能性がある。数理モデルによる解析では、質点は水平方向にのみ変位および力を生じが、物理モデルでは、錘を支えるアームを底板にピンで接続しているため、錘の振幅が大きくなるとアームの接合部を中心とした回転運動が生じる。そのため、錘上部に取り付けられた加速度計には回転量に応じた重力加速度が余分に計測される。したがって、この加速度記録から計算された底面せん断力は、解析結果より大きな値を示していると考えられる。

図-13は基盤の入力波形 10 波での物理モデルの滑動量を残留滑動量とし、物理モデルの固有周波数 f_0 と基盤加速度周波数 f_b の比に対してプロットしたものである。図には、基盤入力加速度の異なる3ケースの結果と、図-1で示した振動-滑動数理モデルによる計算結果($\mu_s=0.20$)を同時に示している。計算パラメータは、4章で示した実験条件と同様である。共振条件 $f_0/f_b=1.0$ の位置は点線で示している。図から物理モデルの固有周波数と基盤加速度周波数の比が残留滑動量の発生に与える影響が非常に大きいことがわかる。共振条件を挟んで、左側が比較的柔な構造物を表し、右側が比較的剛な構造物を表しているが、上述した通り比較的剛な構造物の場合で、残留滑動量が大きくなる傾向が確認できる。これに加え、観測結果と解析結果の対応も良好であることがわかる。特に、共振条件を中心に、その左側の範囲で非常に良い一致が見られた。図は右側に行くほど、振動台の振幅が大きくなるため、基盤加速度の波形の乱れや観測結果に誤差が生じたものと考えられる。

振動台の特性や動的な摩擦特性の影響などの様々な要因によって、実験は理想的な条件で行われたとはいえないが観測結果の記録から、実験の再現性は良好であったといえる。

5. まとめ

実施した一連の振動台実験により、振動特性の違いが構造物の滑動特性に大きく影響し、特に対象とする構造物が比較的剛なとき、すなわち構造物の固有周波数が基盤加速度周波数より高いとき、慣性力と底面せん断力の位相が合致し、地震時における構造物の滑動量に大きく反映されることが明らかとなった。加えて、振動-滑動数理モデルによる解析結果と観測結果との比較から、数理モデルの妥当性をある程度示すことができた。

【参考文献】

- 1) Newmark, N. M. (1965): 'The 5th Rankine Lecture: Effects of Earthquakes on Dams and Embankments,' Geotechnique, Vol.5, No.2, pp.139-160.
- 2) Newmark, N. M. and Hall, W. J. (1974): 'A rational Approach to seismic design standards for structures,' Proc. of 5th EWCEE, Vol.2, pp.2266-2277.
- 3) 三浦均也, 小濱英司, 吉田望, 渡邊潤平: 'すべり土塊および抗土圧構造物の固有振動数を考慮した地震時滑動量の推定法,' 土木学会地震工学論文集, Vol.28, 201, 2005.
- 4) 澤田純男, 土岐憲三, 村川史朗 (1998): '片側必要強度スペクトルによる盛土構造物の耐震設計法,' 日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.10, pp.3033-3038.

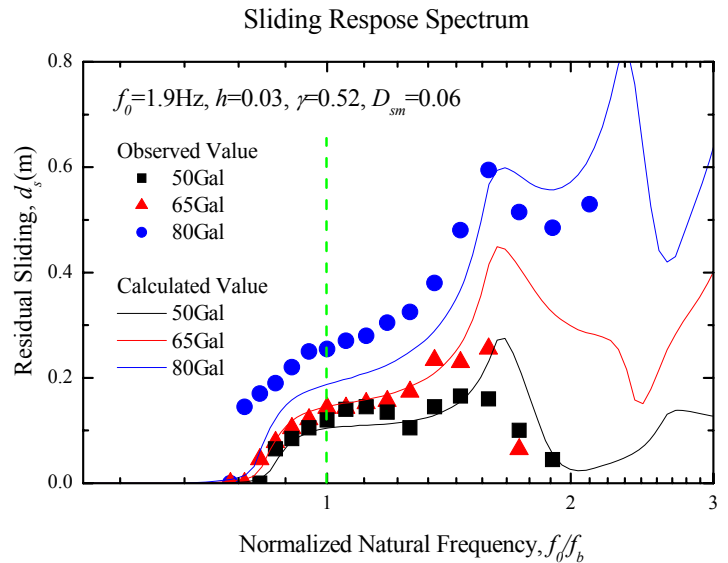


図-13 残留滑動量と正規化振動数 f_0/f_b の関係